

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КИНЕТИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

MECHANICAL PROPERTIES OF METAL COMPOSITIES BY KINETIC INDENTATION METHOD

Д.А. Коновалов¹, С.В. Смирнов², И.А. Веретенникова³

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук,

г. Екатеринбург, ¹konovalov@imach.uran.ru, ²svs@imach.uran.ru, ³irincha@imach.uran.ru

Abstract

Possible of determination strength properties of metal composites individual layers by kinetic indentation is shown.

Введение

Значительная технико-экономическая эффективность использования слоистые металлические композиционные материалы обусловлена тем, что, во-первых, за счет определенного сочетания различных металлов и сплавов в композите удастся объединить нужные эксплуатационные свойства его компонентов, а в ряде случаев получить специфические свойства; во-вторых, изготовление изделий с разными по сечению механическими и физическими свойствами позволяет одновременно уменьшить расход дорогостоящих легированных сталей и цветных металлов за счет их использования в композиции с более дешевыми углеродистыми сталями. При формировании требуемого комплекса эксплуатационных свойств важным является не только уровень прочностных свойств для композиции в целом, но и их распределение по отдельным слоям. Далеко не всегда возможно оценить изменение этих свойств, исходя из теоретических представлений, так как в силу случайного характера в различии свойств исходных листов, а также отклонений в реализации технологического цикла прокатки, прочность слоев может также изменяться в определенном диапазоне [1, 2]. Контроль прочностных свойств отдельных слоев слоистого композита, особенно подвергнутого пластическому деформированию, является сложной задачей.

В предыдущих работах авторами была разработана, апробирована и адаптирована методика, позволяющая получать кривую деформационного упрочнения по результатам испытаний на вдавливание трех конических инденторов с разными углами конусности с помощью портативного твердомера [3]. Методика кинетического индентирования позволяет определять локальные механические свойства, что

является важным преимуществом, когда разборка на отдельные компоненты невозможна, или нежелательна. В представляемой работе показана возможность определения с помощью разработанной методики предела текучести в отдельных слоях многослойного композиционного материала, полученного сваркой взрывом, и после его деформирования прокаткой.

Материалы и методики проведения исследований

Для получения композитов использовали нержавеющую сталь аустенитного класса 12Х18Н10Т, углеродистую сталь 20 в виде горячекатаного листа и медь марки М1. С помощью сварки взрывом (взрывное плакирование) [4], проведенной в ООО «Уралтехнопроект» (г. Екатеринбург), были получены пластины трехслойных композитов «12Х18Н10Т+сталь20+12Х18Н10Т» и «М1+сталь20+М1» (табл.1). В результате сварки образовались неразъемные сварные соединения, граница которых имеет характерное «волнообразное строение» и узкую диффузионную зону на границе сварного шва [5,6].

Из пластин были вырезаны заготовки для последующей прокатки размерами 8,35х35х110 мм. Прокатка была проведена* при комнатной температуре на лабораторном прокатном стане с диаметром валков 255 мм, со скоростью 0,2 м/с. Величина относительного изменения площади поперечного сечения композита при прокатке (относительное обжатие) составляла 50%. Для определения особенностей изменения прочности материалов в составе композита по сравнению с прокаткой однослойного металла исходные листовые заготовки сталей 20, 12Х18Н10Т и меди М1 прокатывались также при суммарном обжатии 50%.

Таблица 1

Состав и толщина слоев композитов

Комбинация материалов по слоям композита	Толщина композита и его слоев (в скобках)		
	До сварки взрывом, (мм)	После сварки взрывом, (мм)	После прокатки, (мм)
12Х18Н10Т+сталь20+12Х18Н10Т	9(2+5+2)	8,35(1,73+4,71+1,91)	4,1(0,7+2,5+0,8)
М1+сталь20+М1	6(2+2+2)	5,7(1,83+1,96+1,91)	2,9(0,75+1,15+1)

Для проведения кинетического индентирования использовали портативный прибор ТЕСТ – МИНИ – (УТ) в режиме статического нагружения. Принцип работы твердомера состоит в непрерывной регистрации процесса вдавливания индентора в виде диаграммы «нагрузка на индентор P – глубина внедрения h » на трех стадиях процесса: активного нагружения, выдержки под нагрузкой, разгрузки. Диапазон измерения нагрузки: 1 – 140 Н, глубины отпечатка: 1 – 200 мкм.

Для восстановления кривой деформационного упрочнения по результатам кинетического индентирования использовали методику [3]. При этом предполагали, что диаграмма деформационного упрочнения может быть описана аналитически в виде трехпараметрической степенной зависимости

$$\sigma_s = \sigma_T (1 + a_1 \varepsilon)^{a_2} \quad (1)$$

где σ_T – предел текучести; a_1, a_2 – коэффициенты; ε – степень пластической деформации.

Участок нагружения при вдавливании пирамидальных и конических инденторов описывали параболической зависимостью [7-9]:

$$P = ch^2, \quad (2)$$

где коэффициент c зависит от угла индентора и упругопластических свойств материала, в который вдавливается индентор, и не зависит от глубины вдавливания.

Для определения связи коэффициента c с эмпирическими коэффициентами в формуле (1) многократно моделировали методом конечных элементов внедрение конического индентора с заданными углами α в упруго-пластическую среду для множества значений параметров σ_T, a_1, a_2 . При моделировании принимали, что деформируемый материал представляет собой упругопластическую изотропную, изотропно упрочняющуюся сплошную среду. Упругие деформации удовлетворяют закону Гука, пластические подчиняются ассоциированному закону пластического течения с функцией нагружения Мизеса. Индентор представляли как абсолютно жесткое тело. На поверхности среды, контактирующей с индентором, задавали закон трения Прандтля–Ильюшина [10], который объединяет законы трения Амонтона–Кулона и Зибеля. Коэффициенты трения в последних задали соответственно равными 0,1 по данным работы [7] и 0,4 по данным работы [11].

Аналитическую зависимость коэффициента от параметров σ_T, a_1, a_2 искали в виде

$$c_i = E \varphi_i a_1^{n_i} a_2^{m_i}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (3)$$

где, E – модуль Юнга; индекс i определяет значения коэффициентов для соответствующего

угла конуса. Поскольку уравнение (3) нелинейно, то его решение находили методом подбора.

В экспериментах по вдавливанию использовали пирамидальные алмазные инденторы с углами между гранями $90^\circ, 123^\circ$ и 136° . Результаты усредняли по пяти испытаниям каждым индентором. Поскольку методика [3] предполагает использование конических инденторов, то для пирамидальных были найдены, как это обычно принято [7,8], эквивалентные конические инденторы из условия равенства площади проекции: $97^\circ, 129^\circ$ и $140,6^\circ$ соответственно. Использование конических инденторов при моделировании позволило осуществлять решение задачи в осесимметричной, а не в объемной постановке, что существенно уменьшило объем вычислений. Вдавливание осуществляли в торцевую часть слоев поперечного темплата композита. Из пяти диаграмм определяли среднюю, аппроксимировали её функцией (2) и находили значения коэффициента c для испытаний каждым индентором.

Результаты исследования и их обсуждения

Для оценки адекватности результатов по пределу текучести, получаемых с использованием методики кинетического индентирования, они были сопоставлены с данными, полученными ранее [5,6] при растяжении образцов из однослойных листов тех же материалов до и после прокатки с относительным обжатием 50%, которые для наглядности представлены в таблице 2. Там же приведены значения предела текучести, полученные с использованием обсуждаемой методики. Как следует из представленных данных значения пределов текучести по стандартной и предлагаемой методике отличаются менее чем на 5%, что позволяет говорить о возможности использования методики кинетического индентирования для определения величины σ_T деформированных листовых металлических материалов. Исключение составляют листы стали 12X18H10T после прокатки, для которых различие значений предела текучести, полученного по методике, от предела текучести, полученного при растяжении, составляет 8% в меньшую сторону. Однако, этому есть логичное объяснение. Сталь в исходном состоянии имеет аустенитную структуру, но при деформации аустенит превращается в более прочный мартенсит деформации, причем интенсивность превращения зависит от напряженного состояния [12]. При деформации в условиях растяжения интенсивность образования мартенсита больше, а значит измеряемая прочность выше, чем при сжатии, характерном для испытаний на вдавливание инденторов, что и следует из данных в таблице 2.

Таблица 2

Металл		Коэффициент $c \times 10^{-7}$ в формуле (1)			Параметры в формуле (2)		
		90°	123°	136°	σ_T , МПа	a_1	a_2
12X18H10T	Исходное состояние	11174	32646	52676	310/295	70	0,41
	После прокатки 50%	35417	91766	143795	1100/1195	120	0,36
Сталь 20	Исходное состояние	9627	24803	45450	325/320	60	0,24
	После прокатки 50%	15841	50213	85374	750/740	50	0,2
Медь М1	Исходное состояние	4772	11055	21091	115/110	110	0,36
	После прокатки 50%	15084	38991	62617	340/330	300	0,37

Примечания: В числителе приведены значения, полученные по методике, а в знаменателе при растяжении образцов [5,6].

В таблицах 3 – 4 приведены значения коэффициента C в уравнении (2) для усредненных диаграмм вдавливания каждым из трех использованных инденторов в отдельные слои композитов «12X18H10T+сталь20+12X18H10T» и «М1+сталь20+М1» полученных сваркой взрывом и после их прокатки с относительным обжатием 50%, а так же в однослойные материалы. По этим значениям были определены неизвестные коэффициенты в аппроксимации (1) путем решения уравнения (3). Результаты приведены в таблицах 3 и 4.

Предел текучести композитов после сварки взрывом, полученных при растяжении (табл.2), оказывается существенно выше, чем у материала слоев. Например, для стали 12X18H10T $\sigma_T=295$ МПа, стали 20 $\sigma_T=320$ МПа, в то время как предел текучести композита «12X18H10T+сталь20+12X18H10T», образованного из листов этих материалов, составляет $\sigma_T=662$

МПа. Аналогичная картина наблюдается и для композита «М1+сталь20+М1». Такой эффект является довольно распространенным для слоистых металлических композитов после сварки взрывом [1,2]. После пластической деформации композита этот эффект пропадает и начинает выполняться известное «правило смеси», когда прочностные свойства композита соответствуют среднему интегральному значению прочности составляющих его слоев. Это следует из данных, приведенных в таблицах 3 и 4, которые мы сопоставили с данными о пределе текучести композитов «12X18H10T+сталь20+12X18H10T» и «М1+сталь20+М1», полученными в работах [5,6] и приведенными ниже: $\sigma_T = 662/860$ МПа для исходного и деформированного композита «12X18H10T+сталь20+12X18H10T»; $\sigma_T = 385/500$ МПа для исходного и деформированного композита «М1+сталь20+М1».

Таблица 3

Коэффициент св формуле (1) и параметры в формуле (2) для отдельных слоев композита «12X18H10T+Сталь 20+12X18H10T»

Материал слоя в композите		Коэффициент $c \times 10^{-7}$ в формуле (1)			Параметры в формуле (2)		
		90°	123°	136°	σ_T , МПа	a_1	a_2
12X18H10T	До прокатки	20826	63146	97368	620	400	0,25
	После прокатки 50%	29394	88485	127250	900	400	0,27
Сталь 20	До прокатки	11082	36310	57365	400	200	0,22
	После прокатки 50%	14201	46714	68325	490	250	0,25

Таблица 4

Коэффициент c в формуле (1) и параметры в формуле (2) для отдельных слоев композита «М1+Сталь 20+М1»

Материал слоя в композите		Коэффициент $c \times 10^{-7}$ в формуле (1)			Параметры в формуле (2)		
		90°	123°	136°	σ_T , МПа	a_1	a_2
Медь М1	До прокатки	6970	19448	35298	170	300	0,3
	После прокатки 50%	12858	32513	49576	270	280	0,33
Сталь 20	До прокатки	12053	36791	60511	370	200	0,22
	После прокатки 50%	13102	41352	69472	470	250	0,23

Проанализировали изменение значений предела текучести для отдельных слоев композитов до и после прокатки, полученные методом кинетического индентирования (табл.3 и 4). Значение σ_0 для центрального слоя из стали 20 после сварки взрывом для обоих композитов примерно одинаковые и несколько выше, чем для исходных материалов, что может быть связано с их некоторой деформацией во время сварки взрывом. Холодная прокатка сваренного композита с обжатием 50% приводит к росту прочности центрального слоя из стали 20 с 400 до 490 МПа. Однако при этом величина упрочнения существенно ниже, чем для материала однослойной полосы после деформации (325 и 750 МПа, соответственно). Аналогичная ситуация наблюдается и для внешних слоев из стали 12Х18Н10Т и меди М1, металлы в композитах после сварки взрывом упрочняются незначительно, а после дополнительной пластической деформации прокаткой это изменение существенно (310 и 1100 МПа для композита «12Х18Н10Т+сталь20+12Х18Н10Т», 170 и 270 для композита «М1+сталь20+М1»), но величина упрочнения ниже, чем упрочнение в однослойных полосах (620 и 900 МПа для однослойной стали 12Х18Н10Т и 115 и 320 МПа для меди М1).

Из сказанного выше следует, что значения предела текучести определенные методами кинетической твердости и в испытаниях на растяжение, достаточно близки для тех случаев, когда они могут быть сопоставлены. Однако, метод кинетической твердости позволяет получать результаты также для отдельных слоев композита без нарушения их соединения, что является его бесспорным преимуществом. Кроме того, он позволяет получать не только значения предела текучести, но и определять диаграмму деформационного упрочнения. Эта информация может быть использована при оценке поведения композита за пределами упругого состояния. Таким образом, метод кинетического индентирования может быть использован для контроля прочности отдельных слоев многослойных металлических композиционных материалов, без нарушения их соединения.

Исследования выполнены в рамках Программы фундаментальных исследований РАН

№ 12-П-1-1027 и при финансовой поддержке проекта ориентированных фундаментальных исследований № 13-1-019-РЦ.

Список литературы

1. Трыков Ю.П., Шморгул В.Г. Свойства и работоспособность слоистых композитов. - Волгоград: Политехник, 1999.-188 с.
2. Трыков Ю.П., Шморгул В.Г., Гуревич Л.М. Деформация слоистых композитов. - Волгоград: ВолГТУ, 2001.-242 с.
3. Коновалов Д.А., Смирнов С.В., Коновалов А.В. Определение кривых деформационного упрочнения металлов по результатам вдавливания конических индентором. – Дефектоскопия, 2008, №12, с. 55 – 63.
4. Конон Ю.А., Первухин Л.Б., Чудновский А.Д. Сварка взрывом. - М.: Машиностроение, 1987, 216 с.
5. Гладковский С.В., Трунина Т.А., Коковихин Е.А., Вичужанин Д.И., Голубкова И.А. Структура и свойства композита из сталей 12Х18Н10Т+сталь20, полученного сваркой взрывом. - Металловедение и термическая обработка металлов, 2009, №9 (651), с.
6. Гладковский С.В., Трунина Т.А., Коковихин Е.А., Смирнова С.В., Вичужанин Д.И. Прочность и разрушение металлического композита на основе меди М1 и стали 20. - Известия Самарского научного центра Российской Академии наук, 2010, т. 12, №1(2), с.
7. Giannakopoulos A.E., Suresh S. Determination of elastoplastic properties by instrumented sharp indentation. - Scriptamaterialia, 1999, v. 40, № 10, p. 1191-1198.
8. Venkatesh T.A., Van Vliet K.J., Giannakopoulos A.E., Suresh S. Determination of elasto-plastic properties by instrumented sharp indentation: guidelines for property extraction. - Scriptamaterialia, 2000, v. 42, № 9, p. 833 - 839.
9. Bucaille J.L., Stauss S., Felder E., Michler J. Determination of plastic properties of metals by instrumented indentation using different sharp indenters. - Actamaterialia, 2003, v. 51, p. 1663-1678.
10. Ильюшин А.А. Вопросы теории течения пластического вещества по поверхностям-ПММ, 1954, т.18, вып.3, с. 321–329.

- 11.** Тарновский И.Я., Леванов А.Н., Поксваткин М.И. Контактные напряжения при пластической деформации. - М.: Металлургия, 1966. - 280 с.
- 12.** Богачев И.Н., Вайнштейн А.А., Волков С.Д. Введение в статистическое металловедение. - М.: Металлургия, 1984, - 176 с.